

Jörg Evers

## Gebändigtes Röntgenlicht – Quantenzustände aus dem Nichts\*

### Einleitung

Licht hat in seinen vielfältigen Erscheinungsformen eine zentrale Bedeutung für Mensch, Natur und Technik. So ermöglicht es etwa das Sehen und dient Pflanzen der Energiegewinnung durch die Photosynthese. Ebenso hat die breite Verfügbarkeit von künstlichen Lichtquellen weitreichende gesellschaftliche Konsequenzen, weil sie eine weitestgehende Entkopplung vom natürlichen Rhythmus der Sonne ermöglicht. Auch in der Forschung und für viele Anwendungen ist Licht zu einem essentiellen Werkzeug geworden. Weit entfernte Objekte im Weltall können mit Hilfe des von ihnen abgestrahlten Lichts untersucht werden, genauso wie einzelne Atome. Die Möglichkeiten werden dabei wesentlich durch die Verfügbarkeit geeigneter Lichtquellen beeinflusst. Insbesondere der Laser hat durch seine einzigartigen Eigenschaften zu einer Revolution im Bereich der Licht-Materie-Wechselwirkung geführt. In den letzten Jahren hat eine ähnliche Entwicklung im Bereich der Röntgenstrahlung begonnen. Diese Strahlung wurde 1895 durch Wilhelm Conrad Röntgen entdeckt, der von 1879 bis 1888 ordentlicher Professor der Physik an der Universität Gießen war. Für diese Entdeckung wurde ihm 1901 der erste Physik-Nobelpreis verliehen. Weiterentwickelte und neuartige Lichtquellen stellen nun erstmals Röntgenlicht mit einer bisher unerreichten Qualität und Intensität zur Verfügung, vergleichbar mit Laserlicht. Diese neuartigen Lichtquellen werfen die Frage auf, ob sich die Erfolgsgeschichte der Licht-Materie-Wechselwirkung im Röntgenbe-

reich fortschreiben lässt. Zentrales Ziel unserer Arbeit ist es daher, Methoden zu entwickeln, um mit Röntgenlicht die quantenmechanische Dynamik von Materie zu untersuchen, zu manipulieren und zu kontrollieren. Wie im sichtbaren Bereich sind derartige Techniken eine Voraussetzung, um das volle Potential der Lichtquellen erschließen zu können. Als ersten Schritt haben wir eine Methode entwickelt, um sogenannte Überlagerungszustände „aus dem Nichts“ zu erzeugen, die eine wertvolle Ressource für Anwendungen der Quantenmechanik sind.

### Licht und Spektroskopie

Ein tiefer gehendes Verständnis von Licht kann über die Analogie zu einer Wasserwelle gewonnen werden. Wirft man einen Stein in die Mitte einer ruhigen Wasseroberfläche, so breiten sich Wellen aus. Licht lässt sich ebenfalls als eine Welle verstehen, wobei jedoch nicht Materie wie Wasser, sondern elektrische und magnetische Felder periodisch mit der Ausbreitung des Lichts schwingen. Die Höhe der Wellenberge ist dabei ein Maß für die Helligkeit oder Intensität des Lichts. Der Abstand zwischen zwei Wellenbergen, die sogenannte Wellenlänge, charakterisiert die Farbe des Lichts. Diese Interpretation von Licht als elektromagnetische Welle ermöglicht eine Verallgemeinerung über den für Menschen sichtbaren Bereich hinaus und bietet eine einheitliche theoretische Beschreibung für eine Vielzahl von Phänomenen, die ursprünglich als unabhängig voneinander verstanden wurden. So sind Radiowellen, Mikrowellen oder Infrarotlicht ebenso elektromagnetische Wellen wie sichtbares Licht, jedoch mit größerer Wellenlänge. Analog dazu haben ultraviolettes Licht, Röntgenlicht und Gammastrahlung kleinere Wellenlängen.

\*Jörg Evers wurde am 21. November 2014 der Röntgen-Preis der Justus-Liebig-Universität Gießen im Rahmen des Akademischen Festakts verliehen. Der Beitrag gibt die leicht veränderte Fassung seines am Vorabend gehaltenen Vortrags wieder.

Im Allgemeinen setzt sich eine elektromagnetische Welle aus verschiedenen Farbbestandteilen oder Wellenlängen zusammen, wie etwa das Sonnenlicht, bei dem eine Überlagerung einer Vielzahl von Farben einen weißen Farbeindruck ergibt. Die Spektroskopie, d.h. die Zerlegung von Licht in seine Farbbestandteile, ist eine wichtige Methode in den Naturwissenschaften allgemein. Die Bedeutung ergibt sich unter anderem dadurch, dass jedes chemische Element bei der Wechselwirkung mit Licht ein charakteristisches Spektrum erzeugt, anhand dessen es eindeutig identifiziert werden kann. Die Signaturen im Spektrum entstehen dabei durch Übergänge zwischen quantenmechanischen Zuständen von Atomen, die durch Absorption oder Emission von Licht induziert werden. Da diese Zustände für die Atome der einzelnen Elemente verschieden sind, ist auch das jeweils erzeugte Spektrum kennzeichnend.

Die Übergänge zwischen quantenmechanischen Zuständen lassen sich besonders gut durch Laserlicht adressieren, welches sich unter anderem durch eine sehr gut definierte Wellenlänge auszeichnet. Zudem verläuft die zugehörige elektromagnetische Welle praktisch ohne Störungen, und die Lichtintensität kann sehr hoch sein. Durch den Laser ist es inzwischen möglich, die Elektronen in Atome nicht nur sehr präzise mit Licht zu untersuchen, sondern auch ihre quantenmechanische Dynamik gezielt zu beeinflussen oder sogar zu kontrollieren. Insbesondere die Möglichkeit, das zu untersuchende System zu isolieren, aktiv zu manipulieren und dabei die besonderen Eigenschaften der Lichtquelle ausnutzen zu können, hat nicht nur zu einem tiefer gehenden Verständnis geführt, sondern auch zu einer Vielzahl von Anwendungen, die in einigen Fällen sogar bereits kommerziell ausgenutzt werden.

## Röntgenlicht

Laser sind jedoch bisher auf vergleichsweise große Wellenlängen beschränkt. Die neuartigen Röntgenlichtquellen stellen laserartiges Licht bei sehr kleinen Wellenlängen zur Verfügung. Sie beruhen darauf, dass ein fast auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigtes Teilchen

Röntgenlicht abstrahlt, wenn seine Bewegung gezielt aus einer ansonsten geraden Bahn abgelenkt wird. Auch in Deutschland sind derartige Synchrotrons oder Freie-Elektronen-Laser etwa am Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg in Betrieb bzw. im Bau. Aber warum sind derartige Röntgenlichtquellen überhaupt von Interesse? Ein Grund ist, dass die Wechselwirkung von elektromagnetischen Wellen mit Materie stark abhängig ist von der Wellenlänge. Radiowellen etwa durchlaufen einen Menschen weitestgehend ungestört, wodurch ein Radio auch dann Signale empfangen kann, wenn es in der Hand gehalten wird. Sichtbares Licht hingegen wechselwirkt viel stärker mit der Hand, so dass es etwa möglich ist, die Augen mit den Händen vor zu starker Sonnenstrahlung abzuschirmen. Röntgenstrahlung schließlich durchleuchtet die Hand, wobei die Knochen das Röntgenlicht stärker schwächen als das umgebende weiche Gewebe, was die aus der Medizin bekannten Röntgenbilder ermöglicht. Dieses Beispiel verdeutlicht, dass die Kombination verschiedener Wellenlängen erheblich mehr Informationen über ein zu untersuchendes Objekt zugänglich macht als beispielsweise sichtbares Licht alleine. Ein weiterer Grund ist, dass es die sehr kleine Wellenlänge von Röntgenlicht erlaubt, entsprechend kleine Strukturen aufzulösen oder zu schaffen. So wurde mit Hilfe von Röntgenstrahlung etwa die Struktur des menschlichen Erbguts entschlüsselt, und neue Generationen von Computerprozessoren sind oft mit dem Übergang zu kleineren Wellenlängen in der Produktion verbunden.

## Kern-Quantenoptik mit Röntgenlicht

Während sichtbares Licht vorwiegend mit der Elektronenhülle von Atomen wechselwirkt, lässt sich mit Röntgenlicht auch der Atomkern adressieren. Bei unserer Arbeit konzentrieren wir uns insbesondere auf die Wechselwirkung von Röntgenlicht mit sogenannten Mössbauer-Atomkernen. Diese Art von Atomkernen hat die besondere Eigenschaft, in einem nur sehr schmalen Wellenlängenbereich stark (resonant) auf Röntgenlicht zu reagieren. Für die Entdeckung dieses

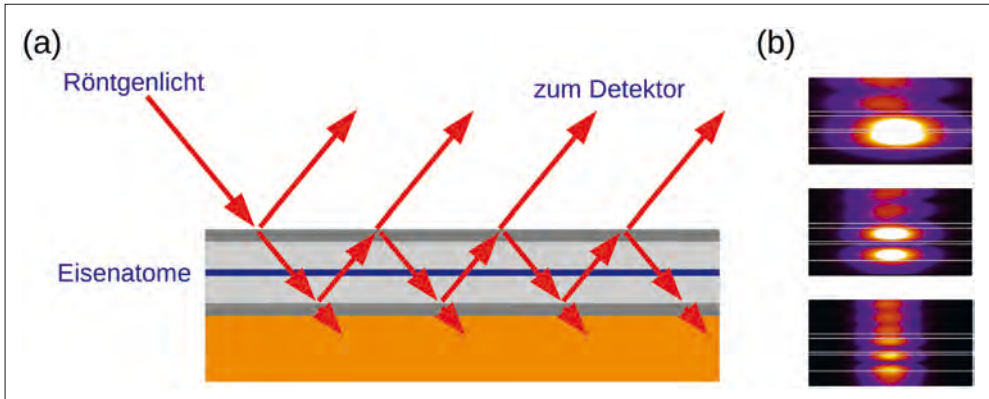


Abb. 1 (a): Schematischer Aufbau der Röntgen-Kavität. Das Röntgenlicht fällt unter flachem Winkel von links auf die aus verschiedenen Schichten aufgebaute Kavität und wird in ihr zwischen den äußeren Schichten hin und her reflektiert. Dabei wechselwirkt es mit den Kernen der Eisenatome in der Kavität. Das reflektierte Licht wird detektiert. – (b): Intensität des Röntgenlichts in der Kavität für verschiedene Einfallswinkel. Helle Farben entsprechen einer hohen Intensität. Durch die Wahl der Intensitätsverteilung wird die Wechselwirkung mit den Atomkernen kontrolliert.

Effekts erhielt Robert Mössbauer 1961 den Nobelpreis für Physik. Da bereits kleinste Änderungen der Umgebung der Atomkerne die ansprechbare Wellenlänge verschieben können, sind sehr präzise Messungen mit Mössbauer-Kernen möglich. So wurde mit Hilfe dieser Kerne von Robert Pound und Glen Rebka etwa eine Vorhersage der Relativitätstheorie, die Verschiebung der Wellenlänge von Licht im Gravitationsfeld der Erde, experimentell nachgewiesen. Ebenso wird dieser Effekt zur Analyse von unbekannten Materialien verwendet, z.B. auch in Weltraumsonden zur Erforschung des Mars.

Zur Untersuchung der Atomkerne verwenden wir eine sogenannte Röntgen-Kavität (siehe Abbildung 1a, b). Diese besteht aus verschiedenen Schichten, die jeweils nur einige Milliardstel Meter dick sind. Die äußeren Schichten wirken dabei wie Spiegel, die das Röntgenlicht zwischen sich hin und her reflektieren. Die Atomkerne können nun als eine dünne Schicht Materie zwischen diese Spiegel eingebracht werden, wodurch eine sehr kontrollierte Wechselwirkung zwischen den Röntgenstrahlen und einer großen Zahl von Atomkernen ermöglicht wird. Als Beobachtungsgröße dient dann das von der Kavität wieder abgestrahlte Licht, was durch die Wechselwirkung mit den Atomkernen verändert wird. Die Atomkerne können dabei von den Röntgenstrahlen in verschiedene

quantenmechanische Zustände angeregt werden, was im Spektrum des reflektierten Lichts nachgewiesen werden kann.

Zentraler Teil unserer Arbeit war die Entwicklung einer theoretischen Beschreibung dieses Aufbaus mit Methoden, wie sie bisher nur für Experimente in anderen Wellenlängenbereichen verwendet wurden [1].\* Diese haben den Vorteil, dass sie eine sehr genaue Analyse der relevanten physikalischen Prozesse erlauben und darüber hinaus auch stärkere Röntgenlichtquellen und quantenmechanische Effekte beschreiben können. Interessanterweise konnten wir zeigen, dass sich das Gesamtsystem aus Kavität und den Atomkernen für die derzeit in Experimenten relevanten Parameter effektiv wieder als ein einzelnes Atom beschreiben lässt. Das vereinfacht nicht nur die Modellierung des ursprünglich komplexen Systems, sondern bietet auch neue Möglichkeiten der Kontrolle. Denn dieses „künstliche Atom“ hat Eigenschaften, die sich etwa durch den Aufbau der Kavität oder die Anordnung der Atomkerne beeinflussen lassen und die über die Eigenschaften natürlicher Atome hinausgehen können. So lässt sich die Struktur der quantenmechanischen Zustände beeinflussen sowie die

\*Die in Klammern gesetzten Zahlen verweisen auf die Literaturangaben am Ende des Beitrags.

Kopplungen zwischen den Zuständen, was Potential für viele Anwendungen bietet.

### **Quantenmechanische Überlagerungszustände ...**

Als eine erste Anwendung haben wir diese Möglichkeiten ausgenutzt, um sogenannte quantenmechanische Überlagerungszustände in den Atomkernen zu präparieren. Diese sind ein zentrales Element der Quantenmechanik. Sind A und B zwei mögliche Zustände eines quantenmechanischen Systems, so ist nach den Gesetzen der Quantenmechanik auch die Überlagerung  $A+B$  ein gültiger Zustand. Entsprechend der von Niels Bohr entwickelten Interpretation der Quantenmechanik (Kopenhagener Deutung) entscheidet erst die Messung des Zustandes  $A+B$ , ob sich A oder B im Experiment ergibt. Vor der Messung ist das System nach dieser Interpretation in den Zuständen A und B gleichzeitig. Derartige Überlagerungen widersprechen offensichtlich unserer Alltagserfahrung mit makroskopischen Objekten. Ein berühmtes Beispiel ist das Gedankenexperiment von Schrödingers Katze, benannt nach dem österreichischen Physiker Erwin Schrödinger. Er entwarf bereits kurz nach Entdeckung der Quantenmechanik ein hypothetisches Szenario, in dem eine Katze in eine Überlagerung der Zustände tot und lebendig gebracht werden kann. Trotzdem sind diese Überlagerungszustände in einer Vielzahl von quantenmechanischen Experimenten nachgewiesen worden und der Übergang zwischen der mikroskopischen und der makroskopischen Alltagswelt ist Gegenstand intensiver Forschung. Neben der Bedeutung für die Interpretation der Quantenmechanik sind Überlagerungszustände eine wichtige Ressource für ihre Anwendungen. Leider ist die Erzeugung von Überlagerungszuständen oft schwierig, und sie sind in der Regel äußerst fragil und müssen aufwändig vor externen Störungen geschützt werden. Dies ist auch ein wesentlicher Grund dafür, dass sie im Alltag in der Regel nicht beobachtet werden können. Überlagerungen zwischen verschiedenen Anregungszuständen von Atomen etwa zerfallen meist sehr schnell von alleine durch die Wechselwirkung

mit dem quantenmechanischen Vakuum, wobei sie Licht an das Vakuum abgeben.

### **... aus dem Nichts**

Wir konnten nun durch die besonderen Kontrollmöglichkeiten in unserem System aus Atomkernen und Kavität eine Situation vorhersagen, in der die Überlagerungszustände durch die Wechselwirkung mit dem quantenmechanischen Vakuum nicht zerstört, sondern stattdessen geschaffen werden. Sie bilden sich also quasi „aus dem Nichts“. Um diese Überlagerungszustände nachzuweisen, können erneut die Welleneigenschaften von Licht ausgenutzt werden. Wirft man zwei Steine gleichzeitig in eine ruhige Wasseroberfläche, so entstehen zwei getrennte Wellen, die schließlich ineinander laufen. Hierbei kann man beobachten, dass es Bereiche gibt, in denen sich die Wellen verstärken. Hier treffen Berge der zwei Wellen aufeinander. An anderen Stellen jedoch löscht sich ein Wellenberg der einen Welle mit dem Wellental der anderen aus, und das Wasser bleibt ruhig – obwohl die Welle eines einzelnen Steins das Wasser bewegt hätte. Diese Kombination von zwei Wellen nennt man Interferenz, und sie tritt auf, weil an bestimmten Stellen die Wirkung der beiden Wellen ununterscheidbar ist. Wie unsere theoretischen Berechnungen zeigen, manifestieren sich die quantenmechanischen Überlagerungszustände in unserem System ebenfalls durch Interferenz. Bei bestimmten Wellenlängen würde jeder der Zustände in der quantenmechanischen Überlagerung für sich alleine zu einem Signal im Spektrum führen. Bei einer Überlagerung aus den verschiedenen Zuständen hingegen wird an derselben Stelle im Spektrum kein Signal gemessen, da sich die Beiträge der verschiedenen Zustände auslöschen. Wie bei Wasserwellen ist diese Interferenz möglich, weil sich in der Überlagerung nicht entscheiden lässt, in welchem der Zustände das Atom sich befindet.

Die theoretischen Vorhersagen konnten in Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern vom DESY, dem Institut für Optik und Quantenelektronik der Friedrich-Schiller-Universität Jena sowie dem Helmholtz-Institut Jena in einem Experiment an

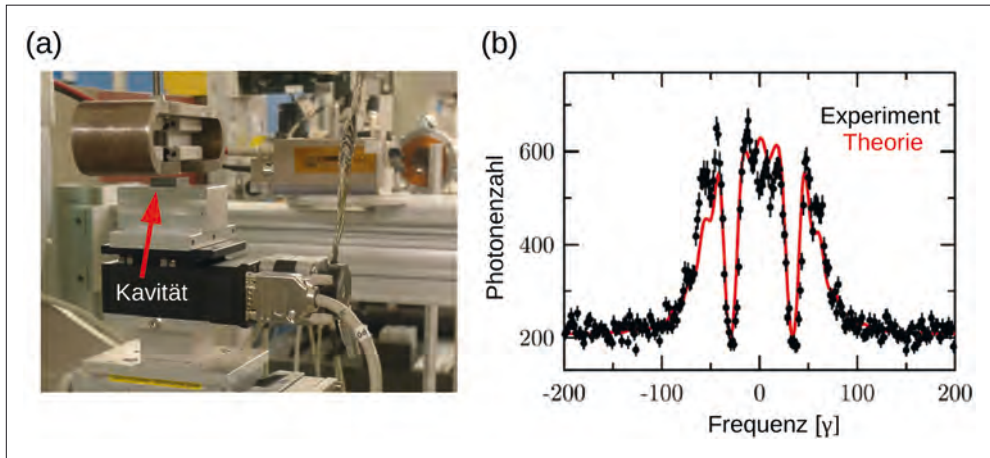


Abb. 2 (a): Foto des experimentellen Aufbaus. Die Kavität mit den Atomkernen ist mit einem Pfeil markiert. Die Röntgenstrahlung kommt aus dem Rohr rechts hinten. Der Detektor ist im Bild nicht zu sehen. – (b): Ergebnis des Experiments. Die Daten zeigen das Spektrum des reflektierten Lichts. Die tiefen Minima sind ein eindeutiges Zeichen für die Entstehung der Überlagerungszustände.

der Synchrotron-Strahlungsquelle PETRA III am DESY in Hamburg erfolgreich überprüft werden (siehe Abbildung 2). In guter Übereinstimmung mit den Vorhersagen war es dabei möglich, das Auftreten der Überlagerungszustände „aus dem Nichts“ gezielt zu steuern und somit eindeutig nachzuweisen [2].

## Ausblick

Die von uns entwickelte Methode realisiert ein gut von der Umgebung isoliertes und hochgradig kontrollierbares quantenmechanisches Modellsystem für die Wechselwirkung mit Röntgenstrahlen und eröffnet somit eine Reihe von viel versprechenden Möglichkeiten. Inzwischen haben wir dieses System in einer Reihe von weiteren Experimenten ausgenutzt, die erneut die gute Übereinstimmung mit unserer theoretischen Modellierung bestätigt haben. Die bisherigen Experimente sind durch frühere Arbeiten mit sichtbarem Licht motiviert. Für die Realisierung im Röntgenbereich war jedoch jeweils die Entwicklung neuer Ideen und Ansätze erforderlich. Interessanterweise lassen sich diese neuen Ansätze auch wieder in den sichtbaren Bereich übertragen, so dass beide Gebiete voneinander profitieren. Zukünftige Experimente werden Atomkerne mit Freie-Elektronen-Lasern

untersuchen, die erneut um mehrere Größenordnungen stärkeres Röntgenlicht bereitstellen und somit einen qualitativ anderen Parameterbereich erschließen. Dies könnte zu konzeptionell neuartigen Methoden im Bereich der Licht-Materie-Wechselwirkung sowie der Materialwissenschaften und der Festkörperphysik führen und Anwendungen etwa im Bereich fundamentaler Tests von physikalischen Theorien und der Präzisionsmetrologie erschließen.

## Literatur:

- [1] K. P. Heeg und J. Evers, X-ray quantum optics with Mössbauer nuclei embedded in thin film cavities, Phys. Rev. A 88, 043828 (2013)
- [2] K. P. Heeg, H.-C. Wille, K. Schlage, T. Guryeva, D. Schumacher, I. Uschmann, K. S. Schulze, B. Marx, T. Kämpfer, G. G. Paulus, R. Röhlberger, and J. Evers, Vacuum-assisted generation and control of atomic coherences at x-ray energies, Phys. Rev. Lett. 111, 073601 (2013)

## Kontakt:

Priv.-Doz. Dr. Jörg Evers  
 Max-Planck-Institut für Kernphysik  
 Saupfercheckweg 1  
 69117 Heidelberg  
 Telefon: 06221 516-177  
 Fax: 06221 516-152  
 joerg.evers@mpi-hd.mpg.de